

30-0203/002

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von  
Beton gegenüber Witterungseinflüssen.

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy  
Dr.-Ing. E.-H. Ranisch

14. Juli 1987

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln  
des Landes Niedersachsen,

Aktenzeichen: 2091-BV 4e - 22/84

<u>Inhaltsangabe</u>	<u>Blatt</u>
1. Einleitung	1
2. Gründe für eine Vorhersage der Nutzungsdauer	1
3. Witterungsbeständigkeit von Beton	5
3.1 Allgemeines	5
3.2 Physikalische Teilangriffe	6
3.2.1 Erosion	6
3.2.2 Last- und Zwangsspannungen	6
3.2.3 Thermische und hygrische Eigen- spannungen	6
3.2.4 Frost	6
3.2.5 Hitze	6
3.3 Chemische Angriffe	7
3.3.1 Betonkorrosion	7
3.3.1.1 Mechanismus	7
3.3.1.2 Säure-Angriff	7
3.3.1.3 Treibender Angriff	7
3.3.2 Stahlkorrosion	7
3.3.2.1 Karbonatisierung	7
3.3.2.2 Chloridangriff	8
4. Gründe für die heutigen Dauerhaftigkeitspro- bleme und ihre Vorhersagbarkeit	9
4.1 Vorbemerkungen	9
4.2 Materialbedingte Gründe für Dauerhaftig- keitsprobleme	9
4.2.1 Betonzuschlag	9
4.2.2 Zement	9
4.3 Planerische und ausführungsbedingte Gründe	10
4.4 Nutzungsbedingte Gründe	11
4.5 Zusammenfassung	11
5. Langzeitverhalten von Beton	12
5.1 Grundsätzliches	12
5.2 Zeitverlauf der Karbonatisierung	14
6. Zeitgeraffte Prüfungen	16

<u>Inhaltsangabe</u>	Blatt
7. Vorschläge für Prognoseverfahren in der Literatur	18
7.1 Allgemeines	18
7.2 Prognose der Frostbeständigkeit	18
7.3 Prognosen für die Bewehrungskorrosion	19
7.3.1 Das schwedische Verfahren	19
7.3.2 Das niederländische Verfahren	19
7.3.3 Statistische Verfahren (reliability analysis)	20
8. Zusammenfassung und Folgerungen	22
Anlage 1: Flußdiagramm der Nutzungsdauervorhersage nach ASTM E 632	
Anlage 2: Ablauf einer dauerhaftigkeitsorientierten Entwurfsmethode nach RILEM TC-60 CSC	
Anlage 3: Flußdiagramm für eine Lebensdauervoraussage für einen Baustoff	
Literaturverzeichnis 13 Seiten	
Tagungen	
Richtlinien	

## 1. Einleitung

Der Begriff Dauerhaftigkeit wird im Sprachgebrauch der Ingenieure für Baustoffe und Bauteile verwendet, die eine längere Zeit wartungsfrei und ohne Qualitätseinbußen überstehen. Dauerhaftigkeit ist keine Materialeigenschaft und nicht quantifizierbar. Ein Bauwerk gilt dann als dauerhaft, wenn es entweder die erwartete Nutzungsdauer wartungsarm erreicht oder eine größere Lebensdauer als andere, mehr oder weniger vergleichbare Bauwerke zeigt. An die Stelle der Dauerhaftigkeitsvorhersage muß daher die quantifizierbare Vorhersage der Nutzungsdauer treten / 12 /. In dieser Arbeit werden Gründe, Voraussetzungen, Möglichkeiten und Probleme der Vorhersage der Nutzungsdauer von Betonbauteilen unter Witterungseinflüssen behandelt. Andere Einflüsse wie chemischer Angriff, Frost-Tausalz-Angriff etc. bleiben unberücksichtigt.

Im Anhang sind besonders ergiebige Veröffentlichungen, Tagungen und Richtlinien angegeben.

## 2. Gründe für eine Vorhersage der Nutzungsdauer

Bis in die sechziger Jahre hinein standen Betonbauwerke bei Fachleuten und Laien in dem Ruf, im Vergleich zu Stahlbauwerken wartungsarm und langlebig zu sein. Die Dauerhaftigkeit von Beton wurde von gleicher Qualität wie die von beständigem Naturstein eingeschätzt. Heute haben wir es mit einer Flut von Betonschäden zu tun. Deren spektakulärste Fälle wurden von den Medien sensationslüstern aufgebauscht und haben in der Öffentlichkeit den Eindruck entstehen lassen, daß die Dauerhaftigkeit des Betons vergleichsweise gering sei. Von dieser Entwicklung schien die Fachwelt z.T. überrascht worden zu sein. Das muß verwundern, hat doch schon Zschokke 1916 /113/ darauf hingewiesen, daß der Korrosionsschutz der Bewehrung durch einen zeitabhängigen Vorgang, der schon seit Beginn der fünfziger Jahre Karbonatisierung genannt wird, aufgehoben wird.

Auch hat sich der Verfall von Bauteilen aus Naturstein und Ziegelmauerwerk ebenso wie der von Beton in den letzten Jahrzehnten in vorher nicht erwartetem Maße beschleunigt / 77/. Die Hauptursache für den bedrohlichen Verfall von insbesondere historisch bedeutsamen Bauwerken während der vergangenen einhundert Jahre ist im wesentlichen bekannt: die im Zuge der Industrialisierung fortschreitende Anreicherung der Atmosphäre mit aggressiven Stoffen. Im Laufe der vergangenen fünfzig Jahre ist der pH-Wert des Regens 5,5 auf 4,4 gesunken. Der pH-Wert dieses Sauren Regens, der im Englischen treffender "Säureregen (acid rain)" genannt wird, stellt nach DIN 4030 für Beton einen "sehr starken" chemischen Angriff dar, dem Beton demnach ohne Schutzüberzug nicht ausgesetzt werden dürfte. Für die überwiegende Zahl der Betonschäden ist der Saure Regen jedoch nicht verantwortlich sondern das gasförmige Kohlendioxid der Atmosphäre, dessen Anteil nicht in dem Maße zugenommen hat wie der pH-Wert gesunken ist.

Nicht leicht zu verstehen ist die Tatsache, daß die große Masse der Betonschäden durch Karbonatisierung und anschließendes Rosten des Bewehrungsstahles nicht an Bauwerken, die erbaut wurden, bevor deren Gesetzmäßigkeiten erforscht waren, sondern hauptsächlich an Bauwerken, deren Entstehung z.T. schon während unseres Berufslebens in Fachzeitschriften gewürdigt wurde. Eine damalige Vorhersage ihrer Lebensdauer wäre sicherlich viel optimistischer gewesen.

Hätte andererseits damals die Lebensdauer zutreffend vorausgesetzt werden können, dürften einschneidende Planungs- und Ausführungsänderungen die Folge gewesen sein.

Das Studium der Betonschäden an witterungsbeanspruchten Bauteilen hat eindeutig gezeigt, daß nicht erfüllte Erwartungen an die Nutzungsdauer zu rund 75% auf Ausführungsfehler zurückzuführen sind / 44 /. Diese sind im wesentlichen:

- Unterschreitung der normenmäßig vorgeschriebenen Betondeckung
- mangelhafte Dichtigkeit der Betondeckung durch unzureichende Verdichtung und Nachbehandlung.

Die Konsequenz ist, daß eine Vorhersage stets für das ausgeführte Bauwerk unter Einbeziehung von vorhandenen Baustoffkennwerten und nicht allein nach Planungsunterlagen erfolgen muß.

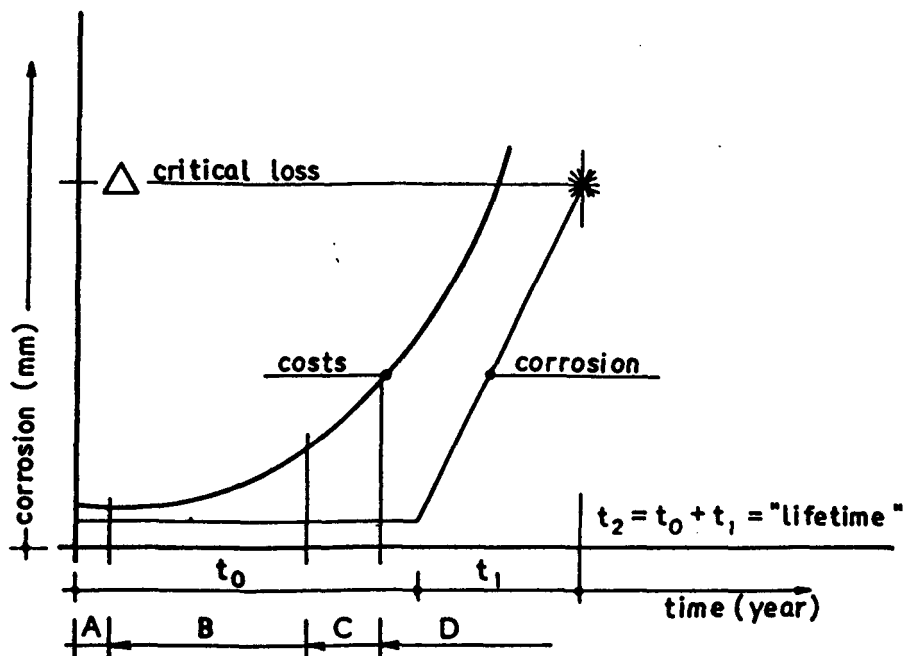
Nach heutigem Kenntnisstand resultiert aus normgerechter Planung und Ausführung von Betonbauwerken auch nach inzwischen überholten Vorschriften eine ausreichende Nutzungsdauer. Die Vorstellungen von Bauherren und Bauausführenden darüber was "ausreichend" ist, klaffen jedoch oft weit auseinander und sind insbesondere von privaten Bauherren auch oft völlig unrealistisch / 3 /. Auch werden die Begriffe Nutzungsdauer und Lebensdauer oft verwechselt. Konkrete Daten sucht man in der Literatur vergeblich, auch z.B. in einem Buch mit dem Titel "Lebenserwartung von Baustoffen" / 31 /.

Das Ende der Nutzungsdauer gilt als erreicht, wenn trotz angemessener Wartung die Tragfähigkeit nicht mehr sichergestellt oder auch der ästhetische Eindruck sich in nicht tolerierbarer Weise verschlechtert hat.

Die Lebensdauer endet hingegen mit dem Versagen wesentlicher Bauteile. Wir müssen akzeptieren, daß es wartungsfreie Baustoffe und Bauteile nicht geben kann. Normgerechter Beton ist wartungsarm. In angemessener Wartung ist deshalb z.B. ein vollflächiger Schutz nicht enthalten.

Wartung und Sanierung unterscheiden sich qualitativ.

Der bedeutende Vorteil einer zutreffenden Vorhersage der Nutzungsdauer liegt nun darin, daß bei unbefriedigender Nutzungsdauer frühzeitig ausgeführte Sanierungsarbeiten von entscheidender technischer und wirtschaftlicher Bedeutung sind. Nach de Sitter / 14 / steigen die Kosten für Ausführung, Unterhaltung, Sanierung und Neubau nach der Funktion  $5^n$  (s. Bild 2.1).



A : Good Practice	\$ 1.-
B : Maintenance	\$ 5.-
C : Repair & Maintenance	\$ 25.-
D : Renovation	\$ 125.-

Bild 2.1: Das "Gesetz der Fünfen" nach de Sitter / 14 / .

Andererseits kann bei geringeren Anforderungen an die Nutzungsdauer die Ausführung darauf abgestimmt werden, was zu Kosteneinsparungen führen könnte. Schließlich werden Vorhersagen über das Langzeitverhalten von neuen oder veränderten Baustoffen sowie Schutz- und Sanierungsmitteln benötigt.

Forschungen auf den Gebieten der Vorhersage des Langzeitverhaltens (service life prediction) und des an der Nutzungsdauer orientierten Entwurfs (service life design, performance concept) nehmen in den USA, Skandinavien, Niederlande, Großbritannien und Japan bedeutenden Raum mit zunehmender Tendenz ein.

### 3. Witterungsbeständigkeit von Beton

#### 3.1 Allgemeines

Als witterungsbeansprucht gelten alle Bauteile, sofern sie sich nicht im Innern von Bauwerken oder ständig unter Wasser befinden oder zusätzlich noch schärferen Beanspruchungen wie z.B. chemische Angriffe nach DIN 4030, Auftausalze, Abrieb etc. ausgesetzt sind. Bauteile, die vor Regen geschützt sind, können dennoch witterungsbeansprucht sein. Die Witterungsbeständigkeit von Beton ist seit über 60 Jahren Gegenstand intensiver Forschung, sowohl durch Auslagerungsversuche als auch durch Bauwerksbeobachtungen. Dabei war das Augenmerk vornehmlich auf das Verhalten unter Einzelangriffen physikalischer oder chemischer Herkunft hoher Intensität gerichtet gewesen. Der atmosphärische Angriff besteht jedoch in Wahrheit aus der Summe von mehreren, im wesentlichen simultan ablaufenden und sich gegenseitig beeinflussenden Teilangriffen, also einer Komplexbeanspruchung. Jeder der Teilangriffe ist für sich betrachtet von geringer Intensität. Über die Komplexwirkung ist bisher wenig bekannt. Die geltenden Regelwerke unterstellen, daß Betone dann ausreichend dauerhaft sind, wenn sie entsprechend dem stärksten Teilan-



griff unterworfen und ausgeführt werden. Da die meisten heutigen Betonschäden auf Ausführungsfehlern beruhen, ist die Richtigkeit dieser Unterstellung noch umstritten.

### 3.2 Physikalische Teilangriffe

#### 3.2.1 Erosion

Winderosion hat nur in Gebieten mit häufigen Sandstürmen und auch dort nur geringe Bedeutung.

#### 3.2.2 Last- und Zwangsspannungen

Zugspannungen können zu Makrorissen führen. Die Breite der Risse kann durch Bewehrungsmenge, -anordnung und -verteilung beeinflusst werden. Bleibt die Rißbreite unter bestimmten Grenzwerten, die nach den sonstigen Teilangriffen vorgegeben werden, gilt die Witterungsbeständigkeit des Betons als nicht beeinträchtigt.

#### 3.2.3 Thermische und hygrische Eigenspannungen

Sie entstehen aus Dehnungsunverträglichkeiten der Betonbestandteile Zementstein und Zuschlag und aus der Gradientenwirkung über die Bauteildicke. Sie können zu Mikrorissen führen, wodurch vor allem der Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein geschwächt werden kann. Über ihre Bedeutung ist noch wenig bekannt. Sie ist Ziel einer mehrjährigen, noch nicht abgeschlossenen Forschungsarbeit der Antragsteller im Auftrag der DFG.

#### 3.2.4 Frost

Der Eisdruck des gefrorenen Porenwassers führt zu einer Gefügelockerung und zu Mikrorissen in den Verbundzonen. Die Folge ist eine irreversible Dehnungszunahme, die vor allem vom Wassergehalt des Betons abhängt.

#### 3.2.5 Hitze

Das Austrocknen des Betons bei erhöhter Temperatur führt zu einer Porositätszunahme. Im meßbaren Umfang tritt sie jedoch erst bei Temperaturen oberhalb von 80° C auf.

### 3.3 Chemische Teilangriffe

#### 3.3.1 Betonkorrosion

##### 3.3.1.1 Mechanismus

Der chemische Angriff besteht entweder im Herauslösen von Bestandteilen oder in Treiberscheinungen.

##### 3.3.1.2 Säure-Angriff

Das Regenwasser mit einem pH-Wert  $< 5$  enthält als Säurebildner vor allem  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  und  $\text{CO}_2$ . Dennoch gilt saurer Regen als kein starker Angriff, da die Oberflächen von richtig geplanten und ausgeführten Bauteilen nur vergleichsweise kurz befeuchtet werden. Der Kenntnisstand hierzu ist jedoch noch gering.

##### 3.3.1.3 Treibender Angriff

Nur bei Vorhandensein von alkalireaktiven Zuschlägen sind witterungsbedingte Treiberscheinungen möglich.

#### 3.3.2 Stahlkorrosion

##### 3.3.2.1 Karbonatisierung

Die Karbonatisierung stellt die Hauptgefahr für Stahlbeton dar. Ihre Gesetzmäßigkeiten können hier als bekannt vorausgesetzt werden. Die Geschwindigkeit des Karbonatisierungsfortschritts hängt im wesentlichen ab:

- von der Permeabilität des Betons,
- vom Wassergehalt des Betons.

Die Geschwindigkeit des Korrosionsfortschritts der Bewehrung im karbonatisierten Beton hängt im wesentlichen ab:

- von der Dicke der Betondeckung,
- von der Verfügbarkeit von Wasser und Sauerstoff,
- von der Zugfestigkeit des Betons,

- vom Durchmesser der Bewehrung,
- von der Rißbildung.

Bei Einhaltung der Vorschriften in bezug auf

- Betondeckung
- Verdichtung
- Nachbehandlung
- Rißkontrolle

erreichen Betonbauteile trotz Karbonatisierung eine ausreichende Nutzungsdauer.

#### 3.3.2.2 Chloridangriff

Durch eindiffundierende Chloridionen wird der natürliche Korrosionsschutz der Bewehrung auch im nicht karbonatisierten Beton geschwächt. Chloridangriff ist jedoch nur ein Sonderfall des atmosphärischen Angriffs, beschränkt auf Bauwerke in unmittelbarer Meeresnähe.

#### 4. Gründe für die heutigen Dauerhaftigkeitsprobleme und ihre Vorhersagbarkeit

##### 4.1 Vorbemerkungen

Es soll zunächst unterstellt werden, daß Betonbauteile, die heute unter Beachtung der Normen, Richtlinien, Empfehlungen etc. geplant und ausgeführt werden, eine ausreichende Nutzungsdauer besitzen werden. Diese Unterstellung ist auch fast uneingeschränkt für ältere Bauwerke richtig, da die meisten Schäden auf Regelabweichungen zurückzuführen sind. Der erste Schritt zur Vorhersagbarkeit hängt also von den Möglichkeiten ab, Regelabweichungen am Bauwerk frühzeitig zu erkennen.

##### 4.2 Materialbedingte Gründe für Dauerhaftigkeitsprobleme

###### 4.2.1 Betonzuschlag

Qualitätsmängel am Zuschlag können folgende Konsequenzen haben:

- Frostschäden
- Alkalitreiben

Beides kann nach dem Auftreten leicht erkannt werden. Vor dem ersten Auftreten können Qualitätsmängel am Zuschlag an Bauwerksproben durch zeitraffende Tests ermittelt werden. Wegen der starken Abhängigkeit der Schadensentstehung von den Umgebungsbedingungen sind Prognosen schwierig.

###### 4.2.2 Zement

Die Festigkeitssteigerung der Zemente ist ein wesentlicher Grund für die Dauerhaftigkeitsmängel von 20 - 30 Jahre alten Bauwerken. Denn diese Festigkeitssteigerung nutzten viele Bauausführenden durch

- geringere Zementgehalte

- höhere w/z-Werte
- kürzere Ausschulfristen
- fehlende Nachbehandlung
- sandreiche Zuschlagsgemische.

Die Folge war eine höhere Permeabilität der Betondeckung mit beschleunigter Karbonatisierung und kaum noch ein Festigkeitsanstieg durch Nacherhärtung. Die Quantifizierung derartiger Mängel am Bauwerk befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

#### 4.3 Planerische und ausführungsbedingte Gründe

Die am häufigsten beobachteten Planungsmängel sind

- Unterschätzung der Bedeutung der Dicke und Dichtigkeit der Betondeckung,
- Mängel an Abdichtungen oder Abführung des Niederschlagswassers,
- Zwangsspannungen nicht beachtet,
- Fehler bei der Bewehrungsanordnung,  
(fehlende Rüttelgassen, zu dichte Bewehrungslagen etc.)
- zu frühe Ausschulung,
- zu schlanke Querschnitte,
- Fehler bei der Betonrezeptur.

Die schlimmsten Ausführungsfehler sind bekanntlich:

- nicht Einhalten der vorgeschriebenen Betondeckung,
- unzureichende Verdichtung,
- fehlende Nachbehandlung,
- Anhebung des Wasserzementwertes durch Wasserzugabe.

Planerische und Ausführungsmängel führen oft zu einem Schadensbild ohne Systematik. Eine Prognose erscheint hier - wenn überhaupt - nur durch sehr umfassende Bauwerksuntersuchungen möglich.

#### 4.4 Nutzungsbedingte Gründe

Hierunter fallen sowohl veränderte Lasten als auch Veränderungen der Umwelt, z.B. sind viele Verkehrsbauwerke mit Tausalzlösungen in Berührung gekommen, für die sie ursprünglich nicht konzipiert worden waren.

Für Prognosen könnten verschiedene Szenarien durchgespielt werden.

#### 4.5 Zusammenfassung

In Kapitel 3 wurden die Teilangriffe aufgelistet, deren Summe den atmosphärischen Angriff darstellt. Kapitel 4 zeigt die Ursachen für eine nicht ausreichende Beständigkeit des Betons. Die Zahl der Einflußgrößen ist groß. Eine gegenseitige Beeinflussung ist anzunehmen.

Der Kenntnisstand über den zeitlichen Ablauf von Zerstörungsprozessen als unverzichtbare Voraussetzung einer Prognose ist noch sehr gering. Die besten Kenntnisse bestehen für die Teilangriffe:

- Karbonatisierung
- Frostwirkung
- Chlorideinwirkung

Auch die zeitliche Festigkeitsentwicklung des Betons ist ziemlich gut bekannt.

## 5. Langzeitverhalten von Beton

### 5.1 Grundsätzliches

Der Gebrauchswert (serviceability) einer Betonkonstruktion in Abhängigkeit von der Zeit läßt sich schematisch entsprechend Bild 5.1 darstellen.

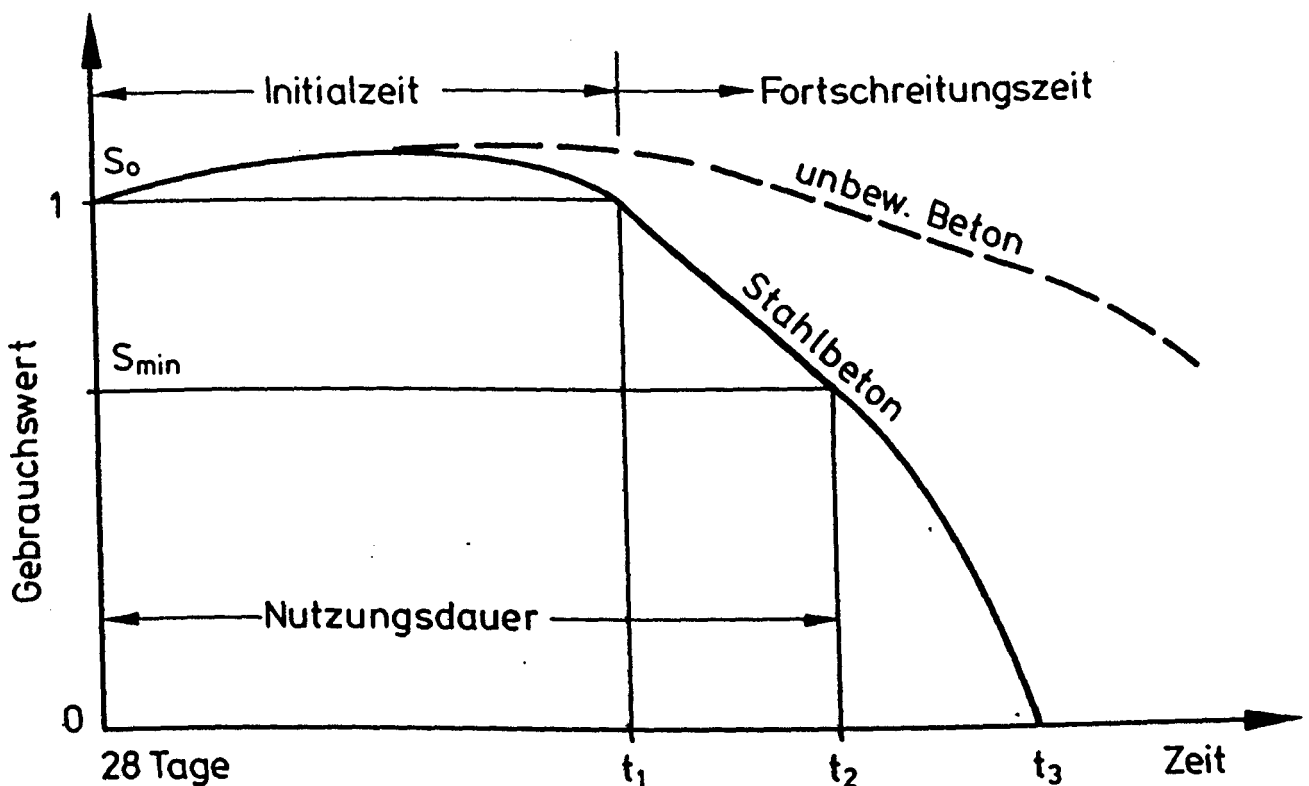


Bild 5.1: Langzeitverhalten von Beton und Stahlbeton

Danach besteht die Lebensdauer aus der Initialzeit (auch Inkubationszeit) und der Fortschreitungszeit (propagation time).

Während der Initialzeit nimmt der Gebrauchswert zunächst noch wegen der Nacherhärtung des Zementes und der Dichtigkeitszunahme durch Karbonatisierung zu.

Zum Zeitpunkt  $t_1$  hat die Karbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht. Jetzt beginnt die Fortschreitungszeit, da der Stahl nicht mehr vor Korrosion geschützt ist.

Zum Zeitpunkt  $t_2$  haben die Korrosionsprodukte zu Rißbildung oder Betonabplatzungen geführt. Damit ist der Mindestwert der zu akzeptierenden Gebrauchsfähigkeit und das Ende der Nutzungsdauer erreicht.

Im weiteren beschleunigt sich die Stahlkorrosion bis zum Zeitpunkt  $t_3$  durch Schwächung der Querschnitte, so daß Einsturz erfolgen kann.

Bei unbewehrtem Beton erfolgt die Abnahme des Gebrauchswertes nur durch die Betonkorrosion (deterioration) hauptsächlich infolge Frost und chemischem Angriff.

Über die Größe der Initialzeit sind - sofern die Karbonatisierung oder Frost als allein ausschlaggebend angesehen wird - quantitative Angaben möglich, zur Fortschreitungszeit eher nur qualitative. Erschwerend kommt hinzu, daß das Ende der Initialzeit äußerlich nicht sichtbar ist. Auch sind die Umgebungsbedingungen, die die Karbonatisierung bzw. Bewehrungskorrosion beschleunigen, unterschiedlich, wie Bild 5.2 veranschaulicht.



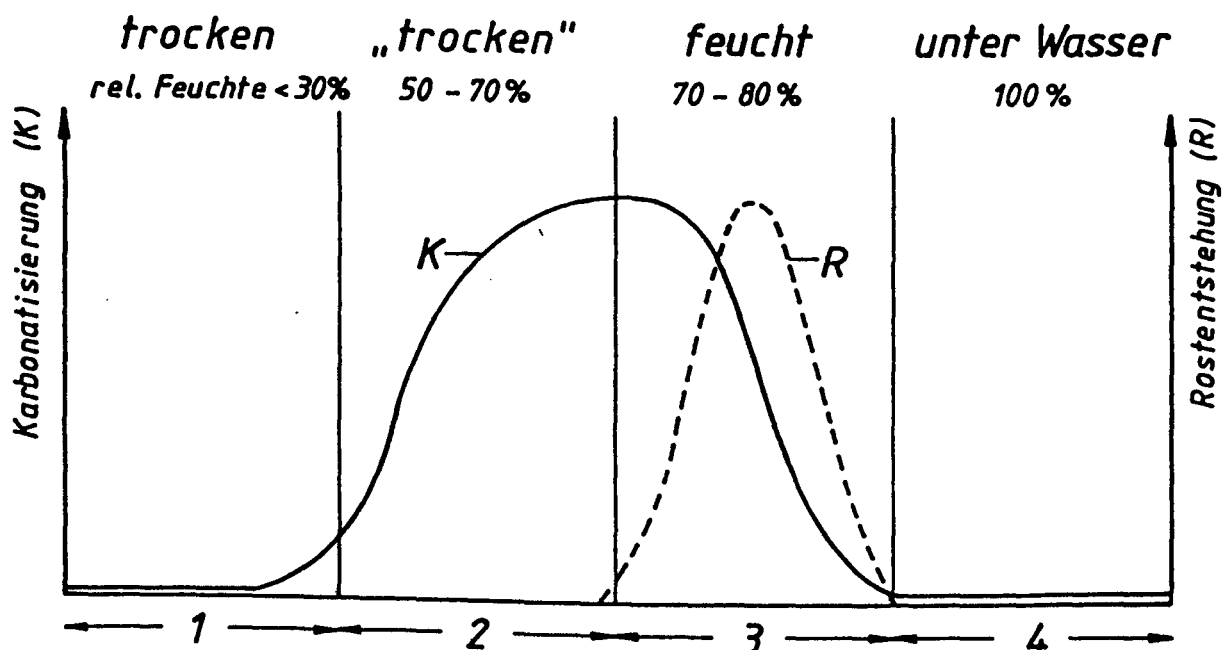


Bild 5.2: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungsintensität, Feuchtigkeit und Rostentstehung

## 5.2 Zeitverlauf der Karbonatisierung

Hierzu liegen Veröffentlichungen mit Ansätzen auf der Basis von Bauwerksuntersuchungen und Laborversuchen seit 1957 vor / 103/. Allen Beobachtungen und Rechenmodellen liegt das  $t$ -Gesetz zugrunde. Mit verschiedenen zusätzlichen Parametern wurde versucht, wenigstens die wichtigsten betontechnologischen Einflußgrößen einzubringen.

Die verschiedenen Ansätze liefern recht breite Streubänder (s. Bild 5.3).

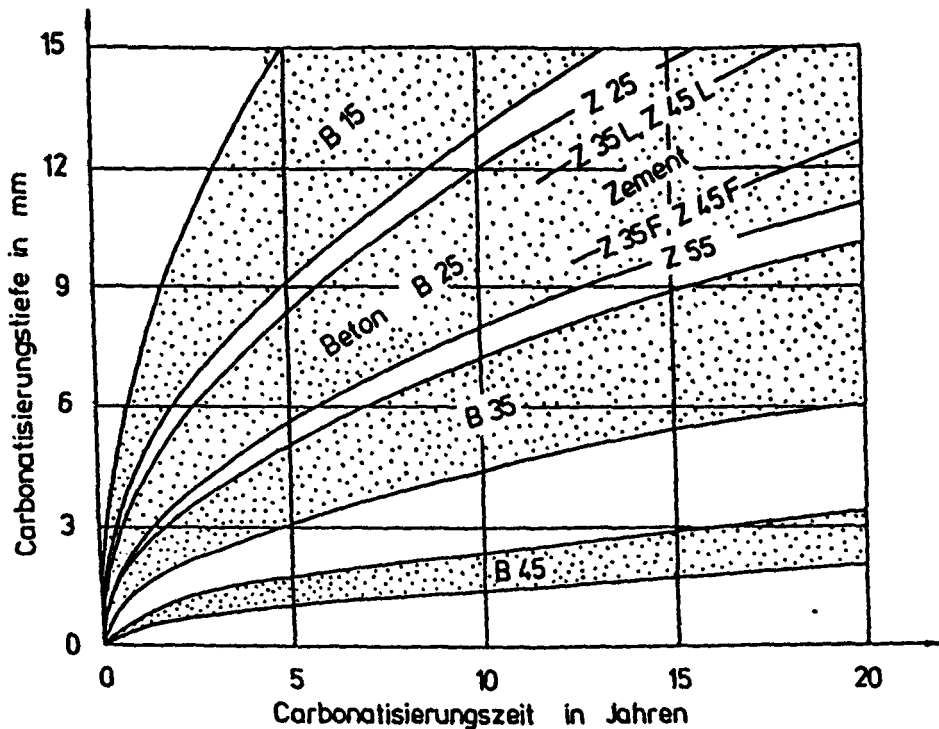


Bild 5.3: Zeitlicher Verlauf der Karbonatation für verschiedene Betone (KLOPFER, 1979)

Der Einfluß der Umgebungsbedingungen kann in den Ansätzen allenfalls durch die Extreme "frei bewittert" oder "vor Regen geschützt" berücksichtigt werden.

Die Obereinstimmung der Ansätze mit den Mittelwerten von Bauteiluntersuchungen ist recht gut. Doch die Streuungen am Bauwerk sind sehr groß. An der Außenseite eines 30 Jahre alten Bauwerks wurden Karbonatisierungstiefen von 1 bis 50 mm gemessen / 99 /.

Für die ersten Schäden sind zwar nicht die örtlich begrenzten Spitzenwerte (beispielsweise an Rissen oder großen Zuschlagkörnern) ausschlaggebend, sondern die Stellen mit schlechter Verdichtung und mangelhafter Nachbehandlung.

Für derartige Stellen ist eine brauchbar genaue Prognose des Karbonatisierungsfortschritts heute noch nicht möglich. Die genauesten Rechenansätze wurden nämlich mit Hilfe von Laborproben entwickelt. Laborbeton ist eben im Gegensatz zur Praxis gut verdichtet und nachbehandelt.

## 6. Zeitgeraffte Prüfungen

In Elektrotechnik und Maschinenbau haben sich zeitgeraffte Prüfungen (accelerated durability tests) zur Vorhersage der Nutzungsdauer bewährt. Das Prinzip besteht darin, die Schädigungsmechanismen durch Erhöhung von Temperatur, Druck, Schadstoffkonzentration etc. soweit zu beschleunigen, bis ein definierter Schädigungsgrad in erheblich kürzerer Zeit als in der Natur erreicht wird.

In aller Regel ist das Verhältnis von zeitgeraffter zu natürlicher Nutzungsdauer eine stark streuende Funktion (nicht Konstante) / 89 /. Der mathematische Aufwand für Prognosen ist daher hoch / 47 /. Für zuverlässige Aussagen sind große Versuchszahlen erforderlich.

Schließlich wird nicht selten durch die Zeitraffung der Zerstörungsmechanismus überhaupt verändert; so daß eine Prognose gar nicht möglich ist / 96 /.

In der Betontechnologie wurden daher z.Zt. zeitgeraffte Prüfungen eigentlich nur ausgeführt, um eine rein qualitative Aussage darüber zu erhalten, ob eine bestimmte Eigenschaft vorhanden ist oder nicht / 53 /. Derartige Prüfungen sind:

- a) Frost-Tausalz-Prüfungen z.B. n.Ö-Norm oder DBV-Richtlinien,
- b) Wasserundurchlässigkeitsprüfung nach DIN 1048,

- c) Karbonatisierungsversuche mit CO<sub>2</sub> angereicherter Atmosphäre,
- d) Prüfung auf Alkalireaktion in feucht/warmem Klima,
- e) Prüfung der chemischen Beständigkeit in konzentrierten Lösungen,
- f) Gasdichtigkeit mit hohen Drücken.

Die Antragsteller erproben zur Zeit im Rahmen einer von der DFG geförderten Forschungsarbeit eine zyklische, thermisch-hygrische Zeittraffungsprüfung von Betonoberflächen.

In der ASTM-Norm E 632, Ausgabe 1982 / 60 /, wurden Regeln für die Entwicklung von Zeittraffungsprüfungen zur Vorhersage der Nutzungsdauer von Bauteilen und Baustoffen angegeben. Das darin enthaltene Flußdiagramm ist auf Anlage 1 wiedergegeben. Ähnliche Anforderungen wurden vom RILEM / 71 / und vom CSTB / 50 / aufgestellt (s. Anlage 2 und 3).

Man erkennt, daß die Entwicklung von brauchbaren Methoden ein iterativer Prozeß ist, der noch sehr große Forschungsanstrengungen erfordert.

## 7. Vorschläge für Prognoseverfahren in der Literatur

### 7.1 Allgemeines

In verschiedenen Institutionen wird weltweit an Methoden zur Vorhersage der Nutzungsdauer von Bauteilen und Baustoffen gearbeitet. Im Gegensatz zur Elektro- und Maschinenbauindustrie gibt es für das Bauwesen noch kein anwendungsreifes oder auch nur praxiserprobtes Verfahren. Die wichtigsten Ansätze werden im folgenden in zeitlicher Reihenfolge vorgestellt (Arbeiten, die sich mit Beton im Meerwasser beschäftigen, bleiben unberücksichtigt).

### 7.2 Prognose der Frostbeständigkeit

Die Möglichkeiten zur Voraussage der Nutzungsdauer von Beton, der überwiegend durch Frost- oder Frost-Tausalz-Angriff beansprucht ist, wurde in Schweden vornehmlich durch Fagerlund / 20 /, / 21 /, / 22 / recht weit entwickelt. Das Verfahren beruht auf der Erkenntnis, daß Beton dann und nur dann durch Frost zerstört wird, wenn sein Wassergehalt zum Zeitpunkt des Gefrierens einen kritischen Wert, den sogenannten kritischen Sättigungsgrad  $S_{krit}$  überschreitet.  $S_{krit}$  ist eine Materialeigenschaft, deren Bestimmbarkeit und Signifikanz in einem Ringversuch / 23 / bestätigt wurde. Für die Prüfung von  $S_{krit}$  gibt es eine RILEM-Richtlinie / 22 / und eine EMPA-Richtlinie / 16 /.

Die Nutzungsdauer endet dann, wenn in statisch oder architektonisch relevanten Bereichen der aktuelle Wassergehalt  $S_{akt}$  größer ist als  $S_{krit}$ .  $S_{akt}$  hat statischen Charakter und hängt über die Wasseradsorption und -desorption von der Zeit ab. In / 19 / werden Hinweise für eine Abschätzung gegeben.

Damit ist jedoch nur erst der Weg vorgezeichnet, seine Gangbarkeit im Einzelfall erscheint höchst problematisch. Die Nutzungsdauer stellt sich nämlich im wesentlichen als von der Launenhaftigkeit des Wetters abhängig heraus.

### 7.3 Prognosen für die Bewehrungskorrosion

#### 7.3.1 Das schwedische Verfahren

Die mit Abstand umfangreichste Arbeit über Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung und/oder Chlorideinwirkung wurde 1982 von Tuutti (Schwedisches Zement- und Betonforschungsinstitut) / 99 / veröffentlicht. Für die Berechnung der Initialzeit werden die bekannten  $\sqrt{t}$ -Gesetze für verschiedene w/z-Werte, Umgebungsbedingungen etc. erweitert. Gesetzmäßigkeiten für die Fortschreitungszeit wurden mit Laborversuchen und Bauwerksdaten ermittelt.

Bei der Berechnung der Nutzungsdauer können nahezu alle maßgeblichen Faktoren des Bauwerks, der Baustoffe und der Umgebung berücksichtigt werden. Natürlich ist der Untersuchungsaufwand entsprechend groß. Nach Ansicht von Tuutti kann das Verfahren dennoch keine genaue Vorhersage liefern. Die Ergebnisse sollen jedoch auf der sicheren Seite liegen und die kürzeste, mögliche Nutzungsdauer liefern.

#### 7.3.2 Das niederländische Verfahren

1982 hat De Sitter Berechnungen der Lebensdauer durchgeführt, die z.T. auf den Versuchen von Tuutti u.a. aufbauen / 14 /. Auf der Materialseite berücksichtigt er nur noch:

- Zementart,
- w/z-Wert,
- Betondeckung.

Folgende beispielhafte Zeiten werden für freie Bewitterung ermittelt:

Beton-deckung	Zement-art	w/z-Wert	Initial-zeit	Fortschreitungs-zeit
mm	-	-	a	a
20	HOZ	0,52	18	2
25	HOZ	0,52	41	2
20	PZ	0,52	73	2
25	PZ	0,52	164	2

Während die Initialzeiten noch plausibel erscheinen mögen, liegen die ermittelten Fortschreitungszeiten außerhalb aller Erfahrung.

7.3.3 Statistische Verfahren (reliability analysis)

Das Prinzip, die Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteiles in Abhängigkeit von der Zeit, Wartungsaufwand und den Alterungsmechanismen zu berechnen, wurde 1985 von Siemes et al. / 87 / veröffentlicht.

Zunächst werden dazu die Initialzeit und die Fortschreitungszeit nach den o.g. Verfahren berechnet. Dann müssen die Variationskoeffizienten für alle Einflußgrößen abgeschätzt werden. Damit erhält man Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (probability density function) für die Nutzungsdauer (s. Bild 7.1).

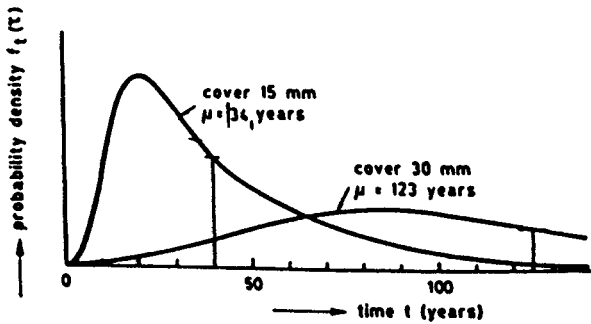


Bild 7.1: Nutzungsdauerverteilungen für 2 unterschiedliche

Die große Streuung der Einflußgrößen führt jedoch zu enormen Streuungen der Nutzungsdauer je nach Entwurfskonzept von 28 bis 474 (!) Jahren.

Dennoch kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der eine bestimmte Lebensdauer erreicht wird. In einem Beispiel wird gezeigt, daß für eine Balkonplatte aus Stahlbeton die Wahrscheinlichkeit einer Nutzungsdauer von mehr als 60 Jahren bei 15 mm Betondeckung 0,13 und bei 30 mm Betondeckung 0,76 beträgt. In ähnlicher Weise kann der Kostenaufwand für Erstellung und Wartung für verschiedene Ausführungen abgeschätzt werden.



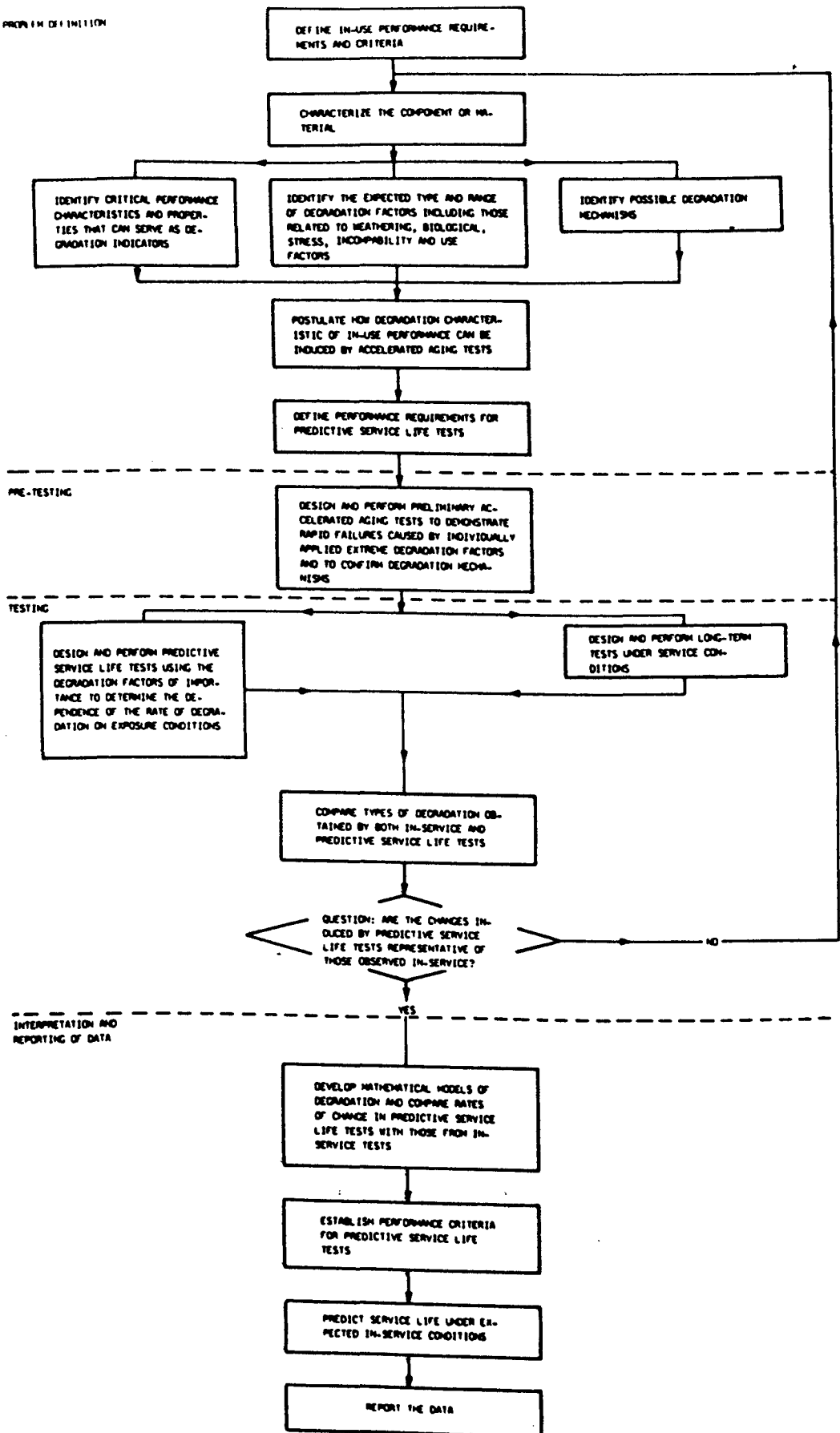
## 8. Zusammenfassung und Folgerungen

Für die Erstellung dieses Forschungsberichtes wurden rund 400 Veröffentlichungen, Tagungsbände, Forschungsberichte etc., die sich vorrangig der Dauerhaftigkeit von Beton, seiner Verbesserung, Bestimmung und Vorhersage widmen, durchgesehen. Der überwiegende Teil davon besaß - häufig auch bei namhaften Verfassern - nur einen geringen Informationsgehalt. Oft wurden Kenntnislücken beklagt, ohne Wege zu ihrer Schließung anzugeben. Oder es wurde die Bedeutung der Streuung der Materialeigenschaften verkannt und Ausführungsfehler verharmlost. Auch wurde mathematisch-statistischer Formalismus propagiert, der an den Bedürfnissen der Praxis vorbeigeht oder mangels Beispielen den meisten Ingenieuren unverständlich bleibt. Viele Autoren gehen am Thema "Dauerhaftigkeit von Beton" vorbei, indem sie sich nur dem hohen Stand der Sanierungstechnik widmen.

Für das Literaturverzeichnis dieser Arbeit wurden 113 Zitate ausgewählt, die etwas Konkretes zum Thema enthalten.

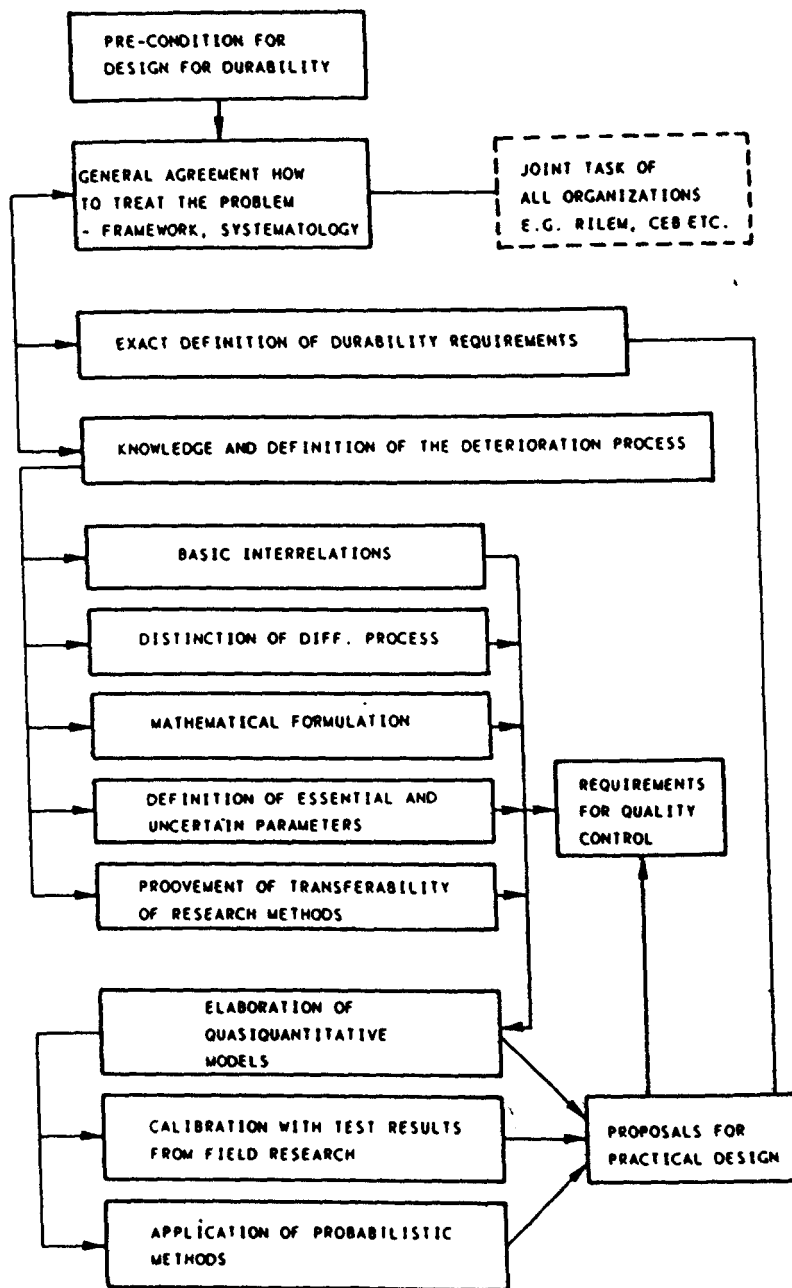
Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Kenntnisstand der Voraussetzungen für dauerhafte Betonbauwerke hoch ist. Bei der Realisierung dieser Kenntnisse in der Praxis sind die Wurzeln von Dauerhaftigkeitsmängeln zu suchen. Deshalb erscheint es im konkreten Falle unmöglich, aus Planungsunterlagen und Betonrezepten auf die Nutzungsdauer zu schließen. Eine Prognose muß hier stets auf Bauwerks- und Baustoffuntersuchungen aufbauen. Die bekannten Methoden und Beurteilungskriterien reichen jedoch z.Zt. für eine hinreichend genaue Vorhersage bei weitem noch nicht aus. Auch muß noch nach Wegen gesucht werden, die Umwelteinflüsse zu quantifizieren. Brauchbare Zeitraffungsversuche müssen dringend entwickelt werden.

Beim Vergleich der heute am weitesten entwickelten Prognoseverfahren kommen die Autoren zu dem Schluß, daß die statistisch orientierten Verfahren am aussichtsreichsten erscheinen. Durch verbesserte Methoden der Bauwerksanalyse und erhöhte Kenntnisse über den zeitlichen Ablauf von Schadensmechanismen und der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens wird sich die heute noch allzu große Streuung der Ergebnisse verringern lassen.

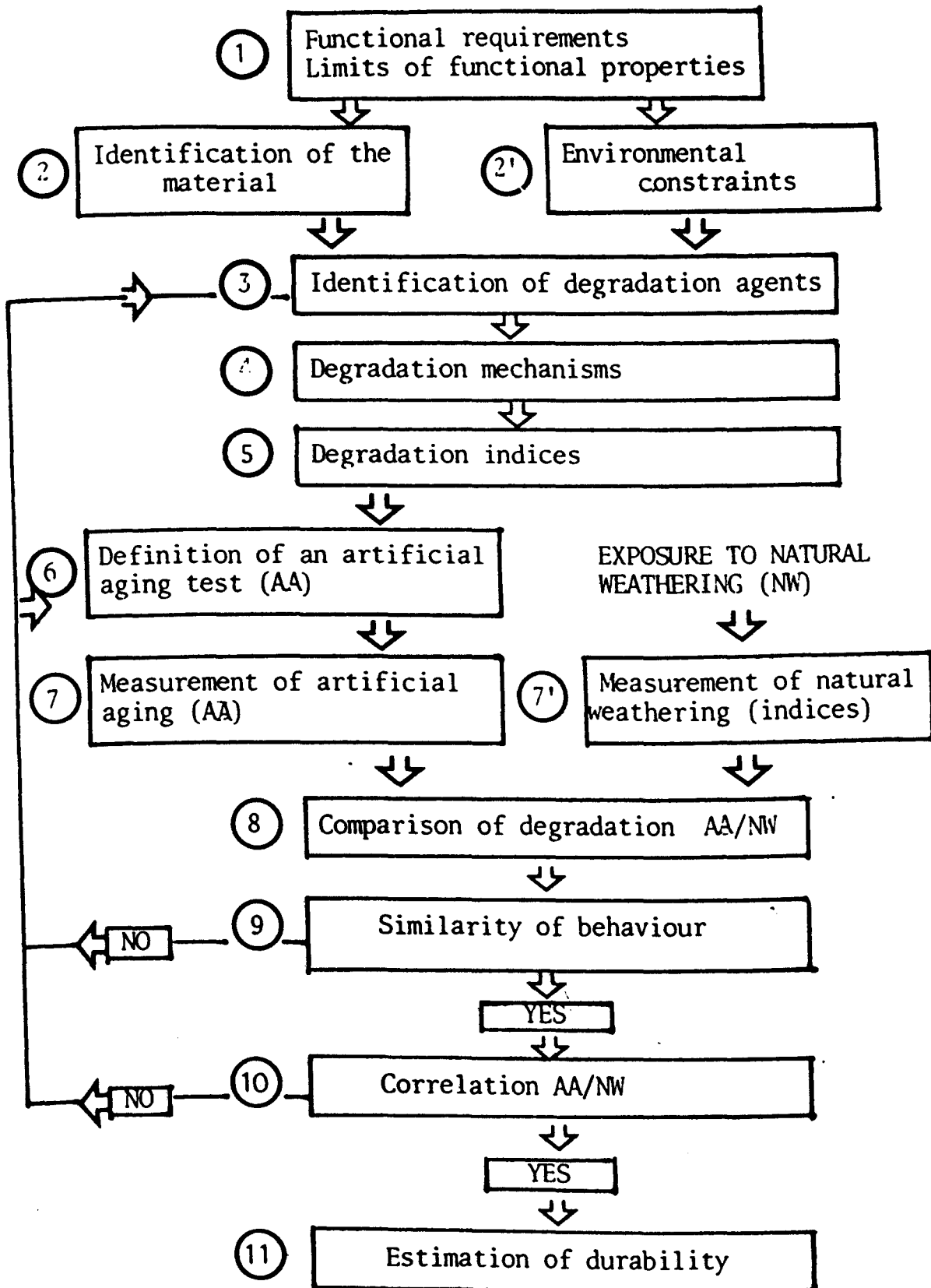


Flußdiagramm der Nutzungsdauervorhersage nach ASTM E 632 / 60 /

## Anlage 2



Ablauf einer dauerhaftigkeitsorientierten Entwurfsmethode  
nach RILEM TC-60 CSC / 71 /



Flußdiagramm für eine Lebensdauervoraussage für einen Baustoff nach / 50 /

- 
- /1/ Alexandre, J.  
Carbonatation du Beton  
in: Matériaux et Construction, Vol.7, No 41, S.367-369
- /2/ Alexejew, Sergej Nikolajewitsch ;  
Rosental, Nikolsai Konstantinowitsch  
Korrosion von Stahlbeton in aggressiver Industrieluft.  
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin : 1979
- /3/ Ammar, C. ; Lonquet, M.  
Belgian Requirements about Buildings Service Life.  
In: ASTM STP 691, Philadelphia : 1980, S.77-90.
- /4/ Arbeitskreis Carbonatisierung  
Carbonatisierung des Betons.  
In: Beton (Herstellung, Verwendung) 22(1972)H.7, S.296/299
- /5/ Bazant, Zdenek P.  
Physical Model for Steel Corrosion in Concrete - Application  
In: Journ. Struct.Div., American Soc.Civ.Eng. 1979,  
S.1155-1166.
- /6/ Beckett, Derrick; Snow, Frederick  
Carbonation and its Influence on the Durability of  
Reinforced Concrete Buildings  
In: Construction Repair & Maintenance January 1986,  
S.14-16
- /7/ Browne, Roger D.  
Testing & Design for Durability of Concrete Structures.  
RILEM Stockholm 1979, Volume 1
- /8/ Browne, Roger D.  
Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete  
in Marine and Other Chloride Environments  
In: Durability of Building Materials 1, 1982, pp.113-125
- /9/ Cady, Philip D.  
Corrosion of Reinforcing Steel.  
In: ASTM STP-169R, Philadelphia 1978, S.275-299.
- /10/ Clear, Kenneth C.  
Time-to-corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs,  
Vol. 3: Performance after 930 Daily Salt Applications.  
Report No. FHWA/RD-76/70, Washington 1976, 59 S.

- 
- /11/ Concrete Society  
Repair of Concrete damaged by Reinforcement Corrosion.  
Concrete Society Technical Report No.26, Wexham Springs 1984
- /12/ Crane, Alan P.  
Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions.  
Chichester Harwood : 1983
- /13/ Currie, R.J.  
Carbonation Depths in Structural-quality Concrete:  
An Assessment of Evidence from Investigations of Structures  
and from other Sources  
Building Research Establishment Report  
London : 1986
- /14/ De Sitter, W.R.  
Berechnung der Lebensdauer von bewehrtem Beton unter  
besonderer Berücksichtigung der Bewehrungskorrosion.  
Hbg, Afdeling S&O, Rapport-Nr. S.387, 1982
- /15/ Drever, Matthias  
Betrachtungen zur Bewehrungsstahlkorrosion infolge des  
Karbonatisierungsfortschrittes von Beton.  
- Auswertung verschiedener Rechenmodelle -  
Entwurfsarbeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahl-  
betonbau, Braunschweig 1986.
- /16/ EMPA  
Prüfung der Wasserleitfähigkeit, der Frostbeständigkeit und  
der Frost-Tausalz-Beständigkeit  
Richtlinien für die Versuchsdurchführung.  
EMPA Duebendorf 1985
- /17/ Engelfried, Robert; Toelle, A.  
Einfluss der Feuchte und des Schwefeldioxidgehaltes der  
Luft auf die Carbonatisation des Betons  
In: Betonwerk + Fertigteil- Technik, Heft 11/1985,  
S.722-729
- /18/ Fagerlund, Goeran  
Essential Data for Service Life Prediction  
NATO ASI Series, Problems in Service Life Prediction...,  
Ed.:L.W.Masters, 1985
- /19/ Fagerlund, Goeran  
Service Life of Structures.  
In: RILEM: Quality Control of Concrete Structures,  
Stockholm 1979, Proc. S.199-215.

- 
- /20/ Fagerlund, Goeran  
Prediction of the Service Life of Concrete Exposed to Frost Action.  
Studies on Concrete Technologie,  
Swed.cem.a.concr.res.inst. Stockholm : 1979  
S.249-276.
- /21/ Fagerlund, Goeran  
Predicting the Service Life of Concrete Structures.  
Proc. of The 1982 Conf. on Cements, Engineering Foundation,  
New York 1982.
- /22/ Fagerlund, Goeran  
The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/thaw Resistance of Concrete  
In: Materiaux et Constructions Vol.10, No.58, S.217-229  
(siehe auch P821)
- /23/ Fagerlund, Goeran  
The International Cooperative Test of the Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/thaw Resistance of Concrete  
In: Materiaux et Constructions, Vol.10, No.58, S.231-253  
(siehe auch B461)
- /24/ Fagerlund, Goeran  
Determination of pore-size distribution from freezing-point depression  
In: Materiaux et Constructions, Vol.6, No 33, 1973, S. 215-225
- /25/ Feldman, R.F. ; Ramachandran, V.S.  
New Accelerated Methods for Predicting Durability of Cementitious Materials  
Durability of Building Materials, Proc. of the 1.Int. Conf. ASTM Spec.techn. Publ. 691, 1980.
- /26/ Franke, L.  
Voraussage der Betriebsfestigkeit von Werkstoffen und Bauteilen unter besonderer Beruecksichtigung der Schwinganteile unterhalb der Dauerfestigkeit  
In: Bauingenieur 60 (1985), S.495-499
- /27/ Frohnsdorff, G.J.C. ; Masters, L.W.  
The Meaning of Durability and Durability Prediction  
Sereda, P.J.; Litvan, G.G.: Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the First International Conference, Ottawa, Kanada, August 1978, pp.17-30



- 
- /28/ Frohnsdorff, G.J.C. ; Masters, L.W. ; Martin, Jonathan W.  
An Approach to Improved Durability Tests for Building  
Materials and Components.  
NBS Technical Note 1120, Washington 1980.
- /29/ Gille, Fritz  
Ueber die Tiefe der karbonatisierten Schicht von alten  
Betonproben  
In: Beton 10 (1960), S.328-330
- /30/ Grunau, Edvard B. ; Isink, Martin  
Stahlbeton - oberflächenschutz und Lebenserwartung  
Bauverlag Wiesbaden : 1981
- /31/ Grunau, Edvard B.  
Lebenserwartung von Baustoffen  
Braunschweig: Vieweg, 1980
- /32/ Hamada, M.  
Neutralization of Concrete and Corrosion of  
Reinforcing Steel.  
Proc. 5.Int. Symp.Chem.Cem.,Tokyo 1968, S.343-369.
- /33/ Hartl, Gerhard  
Generalbericht:Korrosion von Stahlbeton - Praxisnahe  
Auslagerungsversuche; Folgerungen fuer die Neuherstellung  
In: Mitteilungen a.d.Forschungsinst.d.Vereins d.oesterr.  
Zementfabr.,Int.Kolloq.,Wien 0283,Heft 36, S.111-130
- /34/ Hognestad, Eivind  
Design of Concrete for Service Life.  
In: Concrete International 1986, S.63-67.
- /35/ Houst, Yves F.; Roelfstra, Pieter E.; Wittmann, Folker H.  
Ein Modell zur Vorhersage der Nutzungsdauer  
von Betonkonstruktionen  
In: Internationales Kolloquium, Werkstoffwissenschaften  
und Restaurierung, 09.83, S.181-186
- /36/ Ilknur, Bedri  
Ueber die Carbonatisierung von Moerteln und Betonen nach  
Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungen.  
Diss. TH Aachen 1980

- /37/ Jambor, Jaromir  
Possibilities for More Precise Evaluation of the Resistance  
of Concrete to an Aggressive Medium  
Proc. of the First Int. Conference on the Durability of  
Building Materials and Components, U7.78, Hrsg. ASTM 1980,  
S.301-312
- /38/ Kaitila, Heikki  
Practical Recommendations for the Use of Industrial  
By-Products in Concrete with the Focus on the Durability of  
Concrete Structures  
Int. Seminar on some Aspects of Admixtures and Industrial  
By-Products on the Durability of Concrete, Chalmers  
University of Technology, Goeteborg April 1986
- /39/ Kishitani, K.  
Ueber die Bestaendigkeit von Stahlbeton unter dem Einfluss  
von CO<sub>2</sub>  
In: Zement-Kalk-Gips, Nr.4, 1964, S. 158 f
- /40/ Kishitani, Koichi ; Shiire, Toyokazu; Tomosawa, Fuminori;  
Fukushi, Isao ; Kasami, Hideo ; Izumi, Itoshi  
Carbonation of Concrete in Existing Structures up to  
55 Years Old  
VIT Symposium 50, Espoo 1984, Vol.3, S.250-266
- /41/ Klopfer, Heinz  
Die Karbonatisierung von Sichtbeton und ihre Bekaempfung  
In: Bautenschutz und Bausanierung 1 (1978), S.353-359
- /42/ Knoefel, Dietherbert  
Karbonatisierung von Beton  
In: Sonderheft B+B 1983, S.58-63
- /43/ Kreijger, P.C.  
De Duurzaamheid van Beton, met de Nadruk op "Schoon Beton"  
Instituut Ino voor Bouwmaterialien en Bouwconstructies,  
Rapport Nr.BI-71-8/11.5.996
- /44/ Lewandowski, Ralf  
Zur Witterungsbestaendigkeit von Betonen mit Zusaetzen  
von Steinkohlenflugaschen -  
Erfahrungen und Untersuchungen  
In: Beton- u. Stahlbetonbau 78(1983), S.184-190

- 
- /45/ Martin, Horst ; Schiessl, Peter  
The Influence of Time and Environmental Conditions on the  
Corrosion of Deformed Bars in Cracked Concrete  
RILEM Symposium Durability of Concrete, Prague 1969, Vol.2,  
pp.d193-d203
- /46/ Martin, Horst ; Greger, H.  
Corrosion of Steel Due to the Carbonation of Concrete  
RILEM Symposium Durability of Concrete, Prague 1969, Vol.2,  
pp.d219-d239
- /47/ Martin, Jonathan W.  
Time Transformation Functions Commonly Used in Life  
Testing Analysis (Review)  
In: Durability of Building Materials, International  
Journal of Research, 07.82, Nr.2, S.175-194
- /48/ Martin, Jonathan W.  
Time Transformation Functions  
Commonly Used in Life Testing Analysis  
Proc. of the Sec. Int. Conference on the Durability of  
Building Materials and Components, 09.81, S.77-87a
- /49/ Martin, Jonathan W.  
Service Life Prediction from Accelerated Aging Test Results  
Using Reliability Theory and Life Testing Analysis  
NATO ASI Series, Problems in Service Life Prediction...,  
Ed.:L.W.Masters, 1985
- /50/ Masters, Larry W.  
Problems in Service Life Prediction of Building and Con-  
struction Materials  
NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences- No.95, Marti-  
nus Nijhoff Publishers, 1985
- /51/ Meyer, Adolf; Wierig, Hans-Joachim; Husmann, Klaus  
Karbonatisierung von Schwerbeton  
Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton, H.182, S.1-32, Berlin  
1967
- /52/ Meyer, Adolf  
Investigations on the Carbonation of Concrete  
Supplementary Paper 3-52, Proceedings 5 International  
Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo 1968,  
pp.394-401

- 
- /53/ Mielenz, R.C.  
Significance of Accelerated Durability Tests of Concrete  
In: Highway Research Record No.268, 1969, pp.17-34
- /54/ Moll, Hans L.  
Ueber die Korrosion von Stahl in Beton.  
DAFSTB Heft 169
- /55/ Moore, J.K. ; Taylor, M.A.  
Statistical Properties of Techniques for Predicting  
Concrete Strength and Examples of their Use  
Accelerated Strength Testing, SP-56, American Concrete  
Institute, Detroit, 1978
- /56/ Mueller, K.F.  
The Possibility of Evolving a Theory for Predicting the  
Service Life of Reinforced Concrete Structures  
In: Materiaux et Constructions, Vol.18, No.108, 1985
- /57/ Nischer, P.  
Einfluss von Umwelt- und Betonguete auf die Karbonatisierung  
In: Betonwerk+Fertigteil-Technik, Heft 11, 1984, S. 752-757
- /58/ Nischer, Peter  
Einfluss der Betonguete auf die Karbonatisierung.  
Dauerhaftigkeit von Beton  
Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Verfeins der  
Oesterreichischen Zementfabrikanten Heft 37
- /59/ Nishi, Tadao  
Outline of the Studies in Japan Regarding the Neutralisation  
of Alkali (or Carbonation) of Concrete  
RILEM International Symposium on the Testing of Concrete,  
Prag 1961, S.485-489.
- /60/ Norm ASTM E 632  
ASTM E 632:Standard Practice for Developing Accelerated  
Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building  
Components and Materials.  
ASTM E 632-1982
- /61/ Oestlund, L.  
Durability and Safety  
Studies on Concrete Technology, Swedish Cement and  
Research Institute, Stockholm : 1979.

- 
- /62/ Parrot, L.J.; Killoh, D.C.  
Prediction of Cement Hydration.  
Cem.a.Concr.Ass., pp/372, 1984.
- /63/ Parrott, Leslie J.  
Mathematical Modelling of Microstructure and Properties of  
Hydrated Cement  
NATO ASI Series, Problems in Service Life Prediction...,  
Ed.: L.W.Masters, 1985, S.213-228
- /64/ Pihlajavaara, S.E.  
History-Dependence, Ageing, and Irreversibility  
of Properties of Concrete.  
Proc. Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference  
London, Wiley-Interscience, 1971, Part1, 719-741, Paper No69
- /65/ Plum, N.M.; Jessing, J. ; Bredsdorff, P.; Spaehr, H.  
A New Approach to Testing of Building Materials.  
Bull. RILEM No 30, Maerz 1966, S.123-138.
- /66/ Pommersheim, J. ; Clifton, J.  
Prediction of Concrete Service-Life  
In: Materiaux et Constructions, Vol.18, No.103
- /67/ Popovics, Sandor  
New Formulas for the Prediction of the Effect of Porosity  
on Concrete Strength  
In: ACI-Journal Maerz-April 1985, pp.136-146
- /68/ Proschan, F.; Singpurwalla, N.D.  
A New Approach to Interference from Accelerated Life Tests.  
In: J.S.Rustagi: Optimizing Methods in Statistics,  
Academic Press 1979.
- /69/ Prudil, S.  
Model of Concrete Behaviour in Aggressive Environments  
In: Cement and Concrete Research, Vol.7, No.1, Jan.1977  
pp.77-84
- /70/ RILEM  
Carbonation of Concrete.  
RILEM Int.Symp. Wexham Springs, Fulmer Grange 1976

- 
- /71/ RILEM ; CIB  
Prediction of Service Life of Building Materials and Components  
Final Report of CIB W/80, RILEM 71 - PSL, Publication 96  
1986
- /72/ Rehm, Gallus; Moll, Hans L.  
Beobachtungen an alten Stahlbetonbauteilen  
hinsichtlich Carbonatisierung des Betons  
und Rostbildung an der Bewehrung.  
DAFSTB Heft 170, Berlin:1965
- /73/ Rehm, Gallus; Briesemann, D.  
Untersuchungen ueber den Verlauf der Karbonatisierungstiefe im Betonfuss von Fertigteiltraegern  
In: Beton 4/1968, 6 S.
- /74/ Roper, H. ; Baweja, D.; Kirkby, G.A.  
Towards a Quantitative Measure of Durability of Concrete Structural Members.  
ACI SP 82-32
- /75/ Scanlon, John M.  
Concrete Durability Katharine and Bryant Mather Int.Conf.  
ACI SP-100, 1987.
- /76/ Schiessl, Peter  
Zur Frage der zulaessigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Beruecksichtigung der Karbonatisierung des Betons.  
DAFSTB Heft 255, Berlin : 1976
- /77/ Schreiber, Juergen  
Saurer Regen, Kunst Kaputt  
Natur, Nr.7 Juli 1984
- /78/ Schroeder, Fritz; Smolczyk, Heinz-Guenter  
Einfluss von Luftkohlensaure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz fuer Stahleinlagen.  
Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton, Heft 182, Berlin 1967
- /79/ Schwiete, H.E.; Ludwig, Udo ; Ilknur, Bedri  
Ueber die Karbonatisierung von Moerteln und Betonen.  
Forschungsbericht des Landes NRW Nr. 2219, Opladen 1971.

- 
- /80/ Sentler, Lars  
Stochastic Characterization of Concrete Deterioration.  
CEB-RILEM Workshop Durability of Concrete Structures,  
Kopenhagen 1983, S.351-359
- /81/ Sentler, Lars  
Service Life Predictions of Concrete Structures  
Department of Structural Engineering  
Report TVBK-3018 Lund : 1983
- /82/ Sereda, P.J.; Litvan, G.G.  
Durability of Building Materials and Components.  
Proceedings of the 1.Int.Conference, Ottawa 1978
- /83/ Sereda, P.J.; Frohnsdorff, G.J.C.  
Durability of Building Materials and Components.  
Proceedings of the 2. Int.conference, Gaithersburg 1981
- /84/ Shirayama, Kazuhisa  
Research Activities and Administrative Measures on  
Durability of Buildings.  
Materiaux et Constructions Nr.105, Vol.18
- /85/ Siemes, A.; Vrouwenvelder, A. ; Van den Beukel, A.  
Stochastic Modeling of Building Materials Performance in  
Durability  
NATO ASI Series, Problems in Service Life Prediction...,  
Ed.: L.W.Masters , 1985, S. 253-264
- /86/ Siemes, A.J.M.; Vrouwenvelder, A.C.W.  
Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen  
- Anwendung von Zuverlaessigkeitsanalysen.  
In: Cement (1985), S.177-183
- /87/ Siemes, A.J.M.; Vrouwenvelder, A.C.W. ; van den Beukel, A.  
Durability of Buildings: A Reliability Analysis  
Heron, Vol.30, Nr.3, 1985
- /88/ Siemes, T.; Vrouwenvelder, T.  
Durability - a Probabilistic  
Approach  
IABSE Proceedings P-85/85
- /89/ Singpurwalla, N.D.  
Interference from Accelerated Life Tests  
using Arrhenius Type Re-parameterizations.  
In: Technometrics 15(2),1973, S.289-299

- 
- /190/ Sjoestroem, Christer  
Overview of Methodologies for Prediction of Service Life  
NATO ASI Series, Problems in Service Life Prediction...,  
Ed.:L.W.Masters, 1985
- /191/ Sneck, Tenho; Kaarresalo, Anneli  
Third International Conference on the Durability of  
Building Materials and Components,  
Vol.3 + 4: Methologies and Test Methods for Sevice Life  
Prediction.  
Tech.Res.Center of Finnland (VTT), Espoo 1984.
- /192/ Sneck, Tenho  
Methodologies and Test Methods for Service Life Prediction.  
In: Proc.2.Int.Conf.Durability of Build.Mat.a.Comp.  
Gaithersburg 1981, S.63-68.
- /193/ Sneck, Tenho; Kaarresalo, Anneli  
RILEM committee 31-PCM  
Performance criteria for building materials, Final Report  
Espoo: VTT, Dez.1986, (Zug.-Nr.:87-1-029)
- /194/ Somerville, G.  
The Design Life of Concrete Structures  
In: The Structural Engineer, Vol.64 A, No.2, Feb.1986,  
S.60-71
- /195/ Stratfull, Richard F.  
Half-cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete.  
In: Highway Research Record No.433, 1973, S.12-21.
- /196/ Thomas, R.F.  
When is a Life Test Truly accelerated..  
In: Electronic Desigr 1964, S.64-70.
- /197/ Tuuti, K.  
Service Life of Structures with Regard to Corrosion of  
Embedded Steel.  
Swedish Cement and Concrete Research Institute,  
Stockholm 1979, Vol. 1, S.293-301
- /198/ Tuuti, K.  
Service Life of Concrete Structures -  
Corrosion Test Methods.  
Swedish Cement and Concrete Research Institute,  
Stockholm : 1979, S.227-247.  
(Studies on Concrete Technologie)



- 
- /99/ Tuuti, K.  
Corrosion of Steel in Concrete  
In: Swedish Cement and Concrete Research Institute,  
Stockholm, Research 4:82
- /100/ Valenta, O.  
From the 2nd RILEM Symposium Durability of Concrete in  
Prague  
In: Materiaux et Constructions, Vol.3, No 17, 1970, S. 333-  
345
- /101/ Van den Hondel, A.J.; Cornelissen, H.A.W.  
Carbonatatie diepte en Betondekking, gemeten in de Praktijk  
Cement 1986 Nr.9
- /102/ Vrouwenvelder, A.C.W. ; Siemes, A.J.M.; Van den Beukel, A.  
Duurzaamheid Van Gebouwen  
Institute Tno Voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies,  
Rapport Nr.b-83-521/62.3.1916
- /103/ Walz, Kurt  
Witterungsbestaendigkeit von Beton.  
DAFSTB Heft 127, Berlin : 1957
- /104/ Walz, Kurt  
Eigenschaften und Verhalten von Beton nach  
29jaehriger Lagerung im Freien.  
In: Betontechnische Berichte 1972, Duesseldorf:1973, S.33-49
- /105/ Walz, Kurt; Hartmann, E.  
Witterungsbestaendigkeit von Beton, 2. Bericht.  
DAFSTB Heft 274, Berlin : 1977
- /106/ Warnecke, Peter  
Schaden an oberflaechennahen Betonschichten, Methoden zur  
Zustandserfassung, Schadensanalyse und Lebensdauerprognose  
Diplomarbeit, TU Braunschweig, Baustoffkunde und Stahl-  
betonbau ,1986
- /107/ Weher, Dietrich  
Untersuchungen zur Einwirkung von Tausalzen sowie zur  
Karbonatisierung an Bauwerken der Berliner Stadtautobahn  
In: Internationales Kolloquium, Werkstoffwissenschaften  
und Bausanierung, 09.83, S.215-220

- 
- /108/ Weber, H.  
Berechnungsverfahren ueber den Karbonatisierungsfortschritt  
und die damit verbundene Lebenserwartung von Stahlbeton-  
teilen  
In: Betonwerk+fertigteil-Technik, Heft 8, 1983
- /109/ Weber, Helmut  
Berechnungsverfahren ueber den Karbonatisierungsfortschritt  
und die damit verbundene Lebenserwartung von Stahlbeton  
Lehrgang "Impraegnierung poroeser Baustoffe...",  
Techn.Akad.Esslingen 10/84.
- /110/ Wierig, Hans-Joachim  
Longtime Studies on the Carbonation of Concrete under normal  
Outdoor Exposure.  
RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures,  
Hannover 1984
- /111/ Wright, James R.; Frohnsdorf, G.J.C.  
Durability of Building Materials: Durability Research in  
the United States and the Influence of RILEM on Durability  
Research.  
Materiaux et Constructions Nr. 105, Vol. 18, 1995  
p.205-214
- /112/ Zaman, M.S. ; Ridgway, P. ; Ritchie, A.G.B.  
Prediction of Deterioration of Concrete Due to Freezing  
and Thawing and to Deicing Chemical Use  
In: American Concrete Institute Journal, Jan.-Feb. 1982,  
pp.56-58
- /113/ Zschokke, P.  
Ueber das Rosten der Eiseneinlagen im Eisenbeton.  
In: Schweizerische Bauzeitung 67 (1916), S.285

- 
- /1/ RILEM  
Durability of Concrete.  
Int.Symp., Preliminary Report, Prag 1961.
- /2/ RILEM  
V. Int. Symp. on the Chemistrie of Cement.  
Tokyo 1968
- /3/ RILEM  
RILEM Symposium on the Durability of Concrete.  
RILEM, Prag 1969
- /4/ ACI ; Scholer, C.F.  
Durability of Concrete  
ACI SP-47, 1975, Detroit, 385 pp.
- /5/ IABSE ; FIP ; RILEM ; IASS  
Behaviour in Service of Concrete Structures.  
Colloquium Inter- Association Liege 1975  
Tome I-III: Preliminary rts 1155 S., Tome I-V: Final Repo  
Repo
- /6/ RILEM  
Carbonation of Concrete.  
RILEM Int.Symp. Wexham Springs, Fulmer Grange 1976
- /7/ Bazant, Zdenek P. ; Kludum, Weerawat  
Untersuchungen zu einem quantitativen Modell des Korrosions-  
prozesses und des Versagens infolge thermischer Belastung  
bei Meeresbauwerken aus Beton  
In: Procs 176. Behaviour of Off-shore Structures. proceedings.  
Vol.1. Trondheim: Selbstverlag 1976. S. 593-604
- /8/ RILEM  
Testing In-Situ of Concrete Structures.  
RILEM Int.Symposium, Preliminary Reports, Vol.1+2,  
Budapest 1977.
- /9/ Sereda, P.J.; Litvan, G.G.  
Durability of Building Materials and Components.  
Proceedings of the 1.Int.Conference, Ottawa 1978
- /10/ RILEM  
Quality Control of Concrete Structures.  
RILEM/ Swedish Cement and Concrete Research Institute,  
Stockholm (1979)

- 
- /11/ Inst.f.Baustoffe; Kordina, Karl  
Dauerhaftigkeit von Massivbruecken , Alterung, Schaeden,  
Sanierung-  
Sem. Inst.f.Baustoffe, Massivbau u. Brandschutz,  
TU Braunschweig, Okt.1979.
- /12/ Swedish Cement and Concrte Res. Inst.  
Studies on Concrete Technology  
Dedicated to Prof.Sven G.Bergström on his 60th anniversary.  
Swed.Cem.a.Con.Res.Inst., Stockholm 1979.
- /13/ Verein der Oesterr. Zementfabrikanten ; Forschungsinstitut  
Int. Kolloquium, Frostbestaendigkeit von Beton  
Mitteilungen aus dem Forsch. Inst. der ..., Heft 33, Wien,  
Juni 1980
- /14/ Gudmunsson, H.; Chatterji, S. ; Jensen, A.D.; Thaulow, N. ;  
Christensen, P.  
Quantitative Microscopy as a Tool for the Quality Control  
of Concrete.  
Proc.3.Int.Conf. on Cement Microscopy, Houston 1981.
- /15/ Sereda, P.J.; Frohnsdorff, G.J.C.  
Durability of Building Materials and Components.  
Proceedings of the 2. Int.conference, Gaithersburg 1981
- /16/ Rostam, Steen ; RILEM ; CEB  
Durability of Concrete Structures  
CEB - RILEM Int. Workshop, Kopenhagen 1983
- /17/ Crane, Alan P.  
Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions.  
Chichester Harwood : 1983
- /18/ Techn. Universitaet Graz; Jungwirth, Dieter ;  
Postasy, Ferdinand S. ; Springenschmidt, Rupert ;  
Kordina, Karl ; Wicke, Manfred; Specht, Manfred ;  
Gehmayer, Helmuth ; Koherg, A.  
Auffinden und Bewerten von Schaeden an Massivbruecken  
Grazer Kongress, Technische Universitaet Graz 1983.
- /19/ Malhotra, V.M.  
Fly Ash, Silica Fume, Slag & other Mineral By-Products  
in Concrete.  
ACI Publication SP-79: CANMET / ACI Int. Conf. Montebello 83

- 
- /11/ Lauer, K.R.  
A World-wide Review of Reference Standards Developed for  
the Visual Observation of Concrete  
Inter-Association Colloquium "Behaviour in Service of  
Concrete Structures", Liege, 1975, Vol.1, pp.207-218
- /12/ ACI  
Resistance of Concrete in Hydraulic Structures.  
ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Detroit
- /13/ Walz, Kurt  
Anleitung fuer bestaendigen Beton.  
Bearbeitung eines Berichts des ACI Committee 201 "Guide to  
Durable Concrete".  
In: Beton 1979, Heft 7-10
- /14/ ASTM  
Durability of Building Materials and Components.  
ASTM Publication 493, Volume 1 & 2, (1980)
- /15/ ACI  
Guide to Durable Concrete.  
Journal of ACI, Proceedings 74:12
- /16/ Norm BS 1881: Part 122: 1983  
Methods of Testing Concrete. Part 122. Method for  
Determination of Water Absorption  
London, 1983, 3 pp. BS 1881: Part 122: 1983
- /17/ Norm ISO/DIS 7032  
Concrete Hardened - Determination of Permeability  
Geneva, 1983, 5 pp. ISO/DIS 7032 (Based on RILEM Tentative  
Recommendation CPC 13.2.)
- /18/ CEB ; Hartl, Gerhard; van Nieuwerburg, D.A. ; Beeby, A.W.  
Dauerhaftigkeit von Betontragwerken (engl.)  
Publ.d'inform./ Com.Euro-Int. du Beton No.148
- /19/ Reinsdorf, Siegfried  
Qualitaetssicherung im Betonbau, Tl.1. Anforderungen an  
dauerbestaendige Betonkonstruktionen und Eignung der  
Betonbaustoffe  
Berlin/ Ost: Bauak.d.DDR, Bauinformation 1982.48 S.
- /10/ ACI  
Evaluation and Repair of Cracks in concrete Structures.  
ACI Journal Committee Report No. 2241.R-84

- 
- /11/ RILEM  
Meerwasserangriff auf Beton und vorbeugender Massnahmen  
Beton-Informationen, 2/3-86
- /12/ EMPA  
Prufung der Wasserleitfahigkeit, der Frostbestandigkeit und  
der Frost-Tausalz-Bestandigkeit  
Richtlinien fur die Versuchsdurchfuhrung.  
EMPA Duebendorf 1985
- /13/ Holz, K.; Jungwirth, Dieter ; Litzner, H.-U.; Thielen, G.  
Beschraenkung der Rissbreite im Stahlbeton- und Spannbeton-  
Bau  
Deutscher Betonverein, 2.Entwurf 1985
- /14/ CEB ; Rostam, Steen ; Peeby, A.W. ; Hartl, Gerhard;  
Madsen, H.O.; van Nieuwenburg, D.A. ; Schiessl, Peter ;  
Sentler, Lars ; van Vugt, A.P.  
"Draft" CEB-guide to Durable Concrete Structures.  
CEB Bulletin d'information Nr.166, Mai 1985.
- /15/ Deutscher Betonverein  
Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und  
Spannbetonbau  
DBV-Merkblatt  
Deutscher Beton-Verein E.V.

- 
- /20/ Wittmann, Folker H.  
Werkstoffwissenschaften und Bausanierung.  
Int. Kolloquium, Techn.Akad.Esslingen 1983
- /21/ Malhotra, V.M.  
In Situ/ Nondestructive Testing of Concrete  
ACI SP-82, USA, 1984, 825 S.
- /22/ RILEM  
Durability of Concrete Structures  
under Normal Outdoor Exposure.  
RILEM Seminar (Proceedings), Hannover Maerz 1984.
- /23/ SIA ; Wittmann, Folker H.  
Bestaendigkeit von Stahlbeton  
SIA-Dokumentation 72, Studientagung 3./4.April 1984 in  
Zuerich
- /24/ Sneek, Tenho; Kaarresalo, Anneli  
Third International Conference on the Durability of  
Building Materials and Components,  
Vol.3 + 4: Methodologies and Test Methods for Service Life  
Prediction.  
Tech.Res.Center of Finland (VTT), Espoo 1984.
- /25/ Masters, Larry W.  
Problems in Service Life Prediction of Building and Con-  
struction Materials  
NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences- No.95, Marti-  
nus Nijhoff Publishers, 1985
- /26/ Techn. Akademie Esslingen  
Impraegnierung poroeser Baustoffe auf mineralischer Grundlag  
Techn. Akad.Esslingen, Lehrgang Nr.7258/83.022,0kt.1984.
- /27/ TH Leipzig  
Kolloquium zu Problemen des Stahl- und Spannbetonbaues  
21.3.1985 in Leipzig, DDR, in: Wissenschaftliche Blätter der  
Techr. Hochschule Leipzig, 85-02)
- /28/ Bagda, E. ; Techn.Akademie Esslingen  
Umwelteinfluesse auf Baustoffoberflaechen.  
Techn. Akademie Esslingen, Symp. Okt.1985.

- 
- /29/ Techn.Akademie Esslingen  
Bauwerke aus wasserundurchlässigem Beton  
Techn. Akademie Esslingen, Weiterbildungszentrum  
Lehrgang Nr. 8180/84.054 (1985)
- /30/ Concrete Society  
Permeability of Concrete and its Control  
Papers for a One-day Conference, Tara Hotel, Kensington,  
London, 12.Dez.1985
- /31/ Nilsson, Lars-Olof; Chalmers University  
Some Aspects of Admixtures and industrial By - Products on  
the Durability of Concrete  
International Seminar, Chalmers University of Technology,  
Division of Building Materials, 28.-29.April 1986
- /32/ Wittmann, Folker H. ; Techn.Akad.Esslingen  
Werkstoffwissenschaften und Bausanierung  
2. Int.Koll., Techn.Akad.Esslingen, Sep.86.
- /33/ Techn. Universität Braunschweig  
Schützen, Instandsetzen und Verstärken von Betonbauten.  
Weiterbildungsseminar TU Braunschweig, Feb.1987.
- /34/ Scanlon, John W.  
Concrete Durability Katharine and Bryant Mather Int.Conf.  
ACI SP-100, 1987.